

## **Prior Art:**

**for Publication No.: DE 103 17 793.0-34:**

### **Examination Report:**

#### **DE 197 29 891 A1**

This equipment modifies plastic surfaces. It is novel in that a material flowing at constant speed (the medium), is accelerated onto the plastic surface, to improve adhesion to other materials. Also claimed is the corresponding process.

#### **DE 42 40 569 A1**

The invention relates to a manufacturing method for a plastic-metal composition with good adhesive strength, in particular a potentiometer/conducting-track system with a plastics paste/carbon-material (thick-film) potentiometer to be applied to a conducting track. The aim is to achieve greatest possible adhesion between the potentiometer track of the potentiometer and the conducting track. For this purpose it is envisaged that, before applying the potentiometer, preferably a thick-film potentiometer, the conducting track is provided with a defined microroughness in the region of the potentiometer track.

#### **DE 39 32 017 A1**

Electrically conductive structures, such as printed circuit boards, with integrated self-contained connection and plug regions are obtained by the known (semi)-additive method. Both the tracks and the connection and plug regions are metallized in a single operation, and the metallic coating is deposited in these regions with a very low adhesive strength so that it can be readily detached from the surface of the substrate without damaging the latter.

#### **DE 43 28 883 C2**

Polyamide (nylon) mouldings are prepared by pretreatment followed by activation with noble-metal compounds from subgroup 1 and/or 8 of the Periodic Table. The pretreatment is carried out in a liquid comprising a dihydric or polyhydric alcohol having a flashpoint of  $\geq 100$  DEG C, a halide from main groups 1 to 3 of the Periodic Table, an inorganic or organic acid and optionally water.

#### **DE 197 36 449 A1**

The invention relates to a composite composed of a plastic substrate and a thin, continuous metal-containing layer, characterised in that the metal-containing layer is ductile, adheres firmly to the plastic substrate, has a thickness of  $< 2 \mu\text{m}$  and is composed of a compound corresponding to the formula  $\text{MaObCxNyBz}$  wherein: M means one or more metals from the

group comprising Ti, Ta, Nb, Zr and Hf,  $a=0.025$  to  $0.9$   $b=0.025$  to  $0.7$   $x=0.2$  to  $0.9$   $y=0$  to  $0.7$   $z=0$  to  $0.7$   $a+b+x+y+z=1$  provided that the value of  $a$ , starting from the substrate surface, increases from a value approximating zero towards to the layer surface, and at least 50% of the carbon atoms at the base of the layer are bound to other carbon atoms by C-C bonds.



⑬ BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**  
⑩ **DE 197 36 449 A 1**

⑤① Int. Cl.<sup>6</sup>:  
**C 23 C 16/18**  
C 23 C 16/50  
A 61 L 29/00  
A 61 L 27/00  
C 08 J 7/04

⑲ Aktenzeichen: 197 36 449.7  
⑳ Anmeldetag: 21. 8. 97  
㉓ Offenlegungstag: 25. 2. 99

DE 197 36 449 A 1

⑦① Anmelder:  
GfE Metalle und Materialien GmbH, 90431  
Nürnberg, DE

⑦④ Vertreter:  
Abitz & Partner, 81679 München

⑦② Erfinder:  
Breme, Frank, Dipl.-Ing., 91341 Röttenbach, DE;  
Güther, Volker, Dr.rer.nat., 90559 Burgthann, DE;  
Osten, Karl-Uwe van, Dipl.-Ing.(FH), 90584  
Allersberg, DE

⑤⑤ Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht  
zu ziehende Druckschriften:

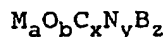
DE 195 06 188 A1  
US 56 07 463  
EP 01 74 743 A2  
WO 95 21 212 A1  
WO 95 20 982 A1  
WO 91 16 378 A1  
WO 91 08 322 A1

JP 4-159338 A., In: Patents Abstracts of Japan,  
C-987, Sep. 22, 1992, Vol. 16, No. 455;

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

⑤④ Verbundwerkstoff

⑤⑦ Die Erfindung betrifft einen Verbundwerkstoff, bestehend aus einem Kunststoffsubstrat und einer dünnen metallhaltigen Schicht, dadurch gekennzeichnet, daß die metallhaltige Schicht duktil ist, fest auf dem Kunststoffsubstrat haftet, eine Dicke von < 2 µm aufweist und aus einer Metallverbindung der Formel



besteht, in welcher bedeuten:

M ein oder mehrere Metalle aus der Gruppe Ti, Ta, Nb, Zr und Hf,

a = 0,025 bis 0,9

b = 0,025 bis 0,7

x = 0 bis 0,9

y = 0 bis 0,7

z = 0 bis 0,7

a + b + x + y + z = 1,

mit der Maßgabe, daß der Wert von a von der Substratoberfläche ausgehend von einem Wert nahe Null zur Schichtoberfläche hin zunimmt.

Der Verbundwerkstoff wird hergestellt, indem man

a) das Kunststoffsubstrat reinigt,

b) eine geeignete metallorganische oder organometallische Ausgangsverbindung auswählt,

c) die metallorganische oder organometallische Ausgangsverbindung, sofern sie nicht gasförmig ist, in die Gasphase überführt,

d) die gasförmige metallorganische oder organometallische Verbindung Ausgangsverbindung mit Hilfe eines Trägergases in einen Reaktor befördert, in welchem sich das Kunststoffsubstrat befindet,

e) dem Substrat durch Beheizen, Plasmaeinkoppelung, Laserbestrahlung etc. Energie so zuführt, daß eine Temperatur von 100°C nicht überschritten wird, und

DE 197 36 449 A 1

## Beschreibung

Die vorliegende Erfindung betrifft einen Verbundwerkstoff aus einem Kunststoffsubstrat und einer fest haftenden dünnen metallhaltigen Schicht. Die metallhaltige Schicht besteht aus mindestens einem Metall aus der Gruppe bestehend aus Ti, Ta, Nb, Zr und Hf und einem Anteil an mindestens einem der Elemente C, B, N, O. Die Erfindung betrifft weiterhin ein Verfahren zur Herstellung eines solchen Verbundwerkstoffes. Die erfindungsgemäßen Verbundwerkstoffe können insbesondere in der Medizintechnik eingesetzt werden.

Die Verwendung von Kunststoffen in der Medizintechnik wird häufig durch ungenügende Oberflächeneigenschaften eingeschränkt. Dies betrifft insbesondere die Bio- und Blutverträglichkeit von z. B. Gefäßprothesen, Kathetern oder Sensoren. So können trotz großer Anstrengungen bis zum heutigen Zeitpunkt Gefäßprothesen aus Kunststoffen mit einem Durchmesser > 6 mm aufgrund der trotzdem bestehenden Thrombosegefahr nur eingeschränkt verwendet und Gefäßprothesen mit einem Durchmesser von < 6 mm in keinem Fall eingesetzt werden. Bei einem Durchmesser von < 6 mm liegt jedoch der sehr große Anwendungsbereich von künstlichen Herzkranzgefäßen (s. R. Zdrahala: Small Caliber Vascular Grafts, J. of Biomaterials Appl., Vol. 10 No. 4, Apr. 1996, S. 309-329).

Auch beim Einsatz von Kathetern kommt es, obgleich diese meist nur kurz in Kontakt zum Körper stehen, aufgrund der mangelnden Körperverträglichkeit der Kunststoffe in vielen Fällen zu Komplikationen, die eine ernsthafte Gefährdung des Patienten bedeuten können (s. R. Dujardin, Polymerstruktur und Thrombogenität, in Symposium Materialforschung - Neue Werkstoffe, S. 724-749; PLR Jülich 1994). Die Verwendung von Kunststoffen ist jedoch aufgrund ihrer vorteilhaften mechanischen Eigenschaften in vielen Bereichen der Medizintechnik unumgänglich.

Es ist bekannt, daß Materialien auf Basis von Titan, Niob, Tantal, Zirkon oder Hafnium bioverträgliche Eigenschaften aufweisen (s. Clarke E.G. und Hickman J., An investigation into the correlation between the electrical potential of metals and their behaviour in biological fluids, J. Bone Joint Surg., Vol. 35 B (1953) 467). Außerdem wurde die ausgezeichnete Blutverträglichkeit von Titanitrid nachgewiesen (s. Y. Mitamura, Development of a ceramic heart valve, in J. of Biomaterials Applications, Vol. 4, Juli 1989, S. 33-55). Es existiert jedoch bis heute kein Material, das sowohl die vorteilhaften mechanischen Eigenschaften der Kunststoffe, als auch die hervorragenden Verträglichkeitseigenschaften der Verbindungen auf der Basis von Ti, Ta, Nb, Zr und Hf aufweist.

Es ist bekannt, daß durch chemische Gasphasenabscheidung (CVD) die Möglichkeit besteht, auch Substrate mit komplizierter Geometrie, wie sie in der Medizintechnik eingesetzt werden, zu beschichten. Allerdings sind bei den bisher meistens verwendeten anorganischen Ausgangssubstanzen zur Beschichtung mit den in Betracht kommenden Materialien Reaktionstemperaturen von > 600°C notwendig (s. S. Siverani, Chemical Vapor Deposition, Van Nostrand Reinhold, New York 1995). Weiterhin ist bekannt, daß durch den Einsatz von organometallischen oder metallorganischen Ausgangssubstanzen Beschichtungstemperaturen von ca. 300°C verwendet werden können (s. Sugiyama: Low Temperature Deposition of Metal Nitrides by Thermal Decomposition of Organometallic Compounds, J. Electrochem. Soc., Sept. 1975, S. 1545-1549). Außerdem wurde berichtet, daß die Beschichtungstemperaturen durch den Einsatz von Lasern oder durch die Einkopplung eines Niederdruckplasmas deutlich gesenkt werden können. Die niedrigste bekannte Beschichtungstemperatur von den in Frage kommenden Materialien wird mit 150°C in Zusammenhang mit der Abscheidung von Ti(C,N) und Zr(C,N) aus Ti[N(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>]<sub>4</sub> bzw. Zr[N(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>]<sub>4</sub> durch plasmaaktivierte CVD (PACVD) angegeben, wobei eine gepulste Gleichstromanregungsquelle für die Erzeugung des Plasmas eingesetzt wurde (s. K.-T. Rie et al., Studies on the synthesis of hard coatings by plasma-assisted CVD using metallo-organic compounds, Surface and Coating Technology 74-75 (1995), S. 362-368). Diese Beschichtung wurde zum Verschleißschutz auf metallischen Substraten aufgebracht, auf denen eine ausreichende Haftfestigkeit problemlos erreicht werden kann.

Es ist jedoch bislang von keiner Beschichtung zur Verbesserung der Oberflächeneigenschaften von Kunststoffen für die Medizintechnik auf Basis der oben genannten Metalle berichtet worden. Dies ist auch nicht verwunderlich, da bei den bislang bekannten Verfahren wegen der zu hohen Temperaturen eine Schädigung des Kunststoffsubstrats eintreten würde, und da in der Fachwelt das Vorurteil bestand, daß Verbundwerkstoffe aus weichen Substraten und harten Schichtmaterialien nicht hergestellt werden können. So beschreibt A. Bolz in seiner Dissertation, Physikalische Mechanismen der Festkörper-Protein-Wechselwirkung an der Phasengrenze α-SiC:H-Fibrinogen, Universität Erlangen-Nürnberg, 1991, daß eine Beschichtung von weichen Substraten, wie z. B. Kunststoffen, mit harten Schichtmaterialien, wie z. B. SiC, wegen des auftretenden "Federbetteffektes" nicht möglich ist.

Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, einen Verbundwerkstoff aus einem Kunststoffsubstrat und einer dünnen, fest haftenden metallhaltigen Schicht auf der Basis von Ti, Ta, Nb, Zr und Hf zur Verfügung zu stellen sowie ein Verfahren zu schaffen, mit dem die Herstellung eines solchen Verbundwerkstoffes gelingt. Es galt dabei ein Beschichtungsverfahren zu entwickeln, das die folgenden Anforderungen erfüllt:

- Keine Beschädigung des Kunststoffsubstrats durch den Beschichtungsprozess, insbesondere durch zu hohe thermische Belastung.
- Ausreichende Haftfestigkeit der Schicht, trotz der extremen Unterschiede in den Eigenschaften von Schicht und Substrat, wie thermische Ausdehnung und Elastizität.
- Glatte Oberfläche der Schicht zur Minimierung von Wechselwirkungen, wie z. B. Adsorptionsvorgänge von Körperflüssigkeiten.

Die hergestellten Verbundwerkstoffe müssen dabei bioverträgliches Verhalten gegen Weichgewebe, Knochen, Blut, etc., zeigen, eine ausreichend Korrosionsbeständigkeit besitzen und darüber hinaus üblicherweise antithrombogenes Verhalten aufweisen.

Die Aufgabe wird gelöst durch einen Verbundwerkstoff, bestehend aus einem Kunststoffsubstrat und einer dünnen metallhaltigen Schicht, dadurch gekennzeichnet, daß die metallhaltige Schicht duktil ist, fest auf dem Kunststoffsubstrat haftet, eine Dicke von < 2 µm aufweist und aus einer Metallverbindung der Formel



besteht, in welcher bedeuten:

M ein oder mehrere Metalle aus der Gruppe Ti, Ta, Nb, Zr und Hf,

a = 0,025 bis 0,9

b = 0,025 bis 0,7

x = 0 bis 0,9

y = 0 bis 0,7

z = 0 bis 0,7

a + b + x + y + z = 1,

mit der Maßgabe, daß der Wert von a von der Substratoberfläche ausgehend von einem Wert nahe Null zur Schichtoberfläche hin zunimmt.

Ein solcher Verbundwerkstoff kann hergestellt werden, indem man

- a) das Kunststoffsubstrat reinigt,
- b) eine geeignete metallorganische oder organometallische Ausgangsverbindung auswählt,
- c) die metallorganische oder organometallische Ausgangsverbindung, sofern sie nicht gasförmig ist, in die Gasphase überführt,
- d) die gasförmige metallorganische oder organometallische Verbindung Ausgangsverbindung mit Hilfe eines Trägergases in einen Reaktor befördert, in welchem sich das Kunststoffsubstrat befindet,
- e) dem Substrat durch Beheizen, Plasmacinkoppelung, Laserbestrahlung, etc., Energie so zuführt, daß eine Temperatur von 100° nicht überschritten wird, und
- f) im Reaktionsraum einen Druck von 0,1 bis 1030 mbar, bei Einsatz eines Plasmas einen Druck von < 50 mbar aufrechterhält.

Durch die vorliegende Erfindung gelingt es, trotz der extremen Unterschiede der Eigenschaften zwischen Kunststoffsubstrat und metallhaltiger Beschichtung, haftfeste Schichten aufzubringen, wodurch eine erhebliche Verbesserung der Oberflächeneigenschaften gegenüber den unbeschichteten Kunststoffen verwirklicht werden kann und damit Kunststoffe in der Medizintechnik für beispielsweise Blutgefäße und dergleichen eingesetzt werden können.

Die Haftfestigkeit ist deshalb ein so großes Problem, da sich die für die Beschichtung in Frage kommenden Materialien erheblich in ihren Eigenschaften von den Kunststoffen unterscheiden. Dies sind z. B. der thermische Ausdehnungskoeffizient, der bei den Kunststoffen um ca. den Faktor 100 größer ist, und die Verformbarkeit. Insbesondere durch das unterschiedliche Ausdehnungsverhalten kann es zu erheblichen Spannungen in der Grenzschicht kommen, was letztlich zum Abplatzen der aufgetragenen Schichten führt. Diese Grenzschichtspannungen können durch einen fließenden Übergang in der Zusammensetzung minimiert werden. Dies gelingt durch das erfindungsgemäß entwickelte Beschichtungsverfahren.

In den Zeichnungen zeigen die

Fig. 1 eine XPS-Analyse der Beschichtung in Abhängigkeit der Schichttiefe unmittelbar nach der Beschichtung, die

Fig. 2 eine entsprechende Analyse nach zweiwöchiger Lagerung des beschichteten Substrats an Luft, und die

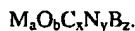
Fig. 3 eine schematische Darstellung des erfindungsgemäßen Beschichtungsverfahrens.

Als Kunststoffsubstrat der erfindungsgemäßen Verbundwerkstoffe eignen sich insbesondere Polyethylenterephthalat (PET), Polyurethan (PUR), Polytetrafluorethylen (PTFE), Polyamid (PA) und Polypropylen (PP), die auch bislang schon zur Herstellung von Gefäßprothesen verwendet worden sind (siehe R. Zdrahala: Small Caliber Vascular Grafts, Part I: State of the Art; Journal of Biomaterials Applications, Vol. 10, April 1996, Seiten 309-329).

Weitere Kunststoffe, die für die vorliegenden Zwecke in Betracht kommen können, sind Polyetheretherketon (PEEK), Polysulfon (PSU), Polybutylenterephthalat (PBT), Polyethersulfon (PES), Polyimid (PI), Polycarbonat (PC), Polyethenimid (PEI), Polyamidimid (PAI) und dergleichen. Alle diese Kunststoffe sind bei einer Temperatur von ca. 100°, bei der die Beschichtung mit der metallhaltigen Schicht erfolgt, stabil.

Auf dem Kunststoffsubstrat befindet sich die dünne metallhaltige Schicht, die eine Dicke von < 2 µm besitzt. Vorzugsweise liegt die Schichtdicke innerhalb eines Bereiches von 5 bis 700 nm, insbesondere innerhalb eines Bereiches von 5 bis 500 nm.

Die metallhaltige Schicht besteht aus einer Metallverbindung der Formel



M bedeutet ein oder mehrere Metalle aus der Gruppe Ti, Ta, Nb, Zr und Hf.

a bedeutet 0,025 bis 0,9; b bedeutet 0,025 bis 0,7; x bedeutet 0 bis 0,90; y bedeutet 0 bis 0,7 und z bedeutet 0 bis 0,7.

a + b + x + y + z betragen zusammen gleich 1.

Es gilt weiterhin die Maßgabe, daß der Wert von a von der Substratoberfläche ausgehend von einem Wert nahe 0 zur Schichtoberfläche hin zunimmt. Dies ist für eine gute Haftung der metallhaltigen Schicht einer Substratoberfläche wichtig. Der Kohlenstoffgehalt ist an der Basis der metallhaltigen Schicht, also nahe der Substratoberfläche, besonders hoch. x nimmt in der Regel einen Wert von nahe 0,9 an. Bei zunehmender Schichtdicke verändert sich die Zusammensetzung der metallhaltigen Schicht beträchtlich. Der Anteil an Kohlenstoff nimmt ab, während die Anteile an Metall, gegebenenfalls Stickstoff, Bor und Sauerstoff zunehmen. Die sich mit der Schichtdicke ändernde Zusammensetzung ist in Fig. 1 am Beispiel einer titanhaltigen Schicht dargestellt. Wie dieser Schichtaufbau im einzelnen hergestellt werden kann, wird weiter unten beschrieben werden.

Vorzugsweise gilt für die Werte von a, b, x, y und z folgendes:

(i) an der Basis der metallhaltigen Schicht:

a = 0,025–0,1

b = 0,025–0,2

x = 0,8–0,9

5 y = 0–0,1

z = 0–0,1

(ii) mit zunehmender Dicke der metallhaltigen Schicht wird der Wert von a größer, und

(iii) nahe der Oberfläche der metallhaltigen Schicht:

a = 0,2–0,9

10 b = 0,025–0,7

x = 0–0,7

y = 0–0,7

z = 0–0,5

15 Nach der Lagerung an Luft verändert sich die Zusammensetzung der metallhaltigen Schicht in ihren obersten Bereichen. Kohlenstoff und Sauerstoff nehmen zu, während die Anteile an Metall und Stickstoff leicht abnehmen. Diese Veränderung ist in Fig. 2 ebenfalls am Beispiel einer titanhaltigen Schicht dargestellt.

Die Schichtzusammensetzungen der Fig. 1 und 2 wurden durch XPS (X-ray photoelectron spectroscopy) bestimmt. Dabei wurden die Tiefenprofile durch Absputtern der Schichten mit Ar<sup>+</sup> aufgenommen.

20 Eines der wenigen bislang bekannten Kriterien für gute Blutverträglichkeit ist neben einer glatten Oberfläche eine Mindestleitfähigkeit von  $L > 10^{-4} \text{ (Ohm} \cdot \text{cm)}^{-1}$  (siehe A. Bolz, Physikalische Mechanismen der Festkörper-Protein-Wechselwirkung an der Phasengrenze a-SiC:H-Fibrinogen, Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg, 1991). Erfindungsgemäß sind Leitfähigkeiten der metallhaltigen Schicht unmittelbar nach ihrer Herstellung von  $L = 2,1 \text{ (Ohm} \cdot \text{cm)}^{-1}$  gemessen worden. Nach 3-tägiger Lagerung an Luft betrug  $L = 0,18 \text{ (Ohm} \cdot \text{cm)}^{-1}$ .

25 Rauheitsmessungen der Schichtoberflächen haben ergeben, daß diese außerordentlich glatt sind. Bei den erfindungsgemäßen Schichtoberflächen sind folgende Rauheitswerte gemessen worden:  $R_a = 0,008 \text{ µm}$  und  $R_z = 0,1 \text{ µm}$ . Im Vergleich dazu liegen die Rauheitswerte der einzigen in der Literatur beschriebenen CVD-Schichten zur Steigerung der Blutverträglichkeit wesentlich höher, nämlich bei:  $R_a = 0,43 \text{ µm}$  und  $R_z = 2,4 \text{ µm}$  (siehe I. Dion, TiN-Coating: Surface Characterization and Haemocompatibility, Bio-materials, Vol. 14, Nr. 3, 1993, Seiten 169–176).

30 Die erfindungsgemäßen Schichten haften außerordentlich fest am Kunststoffsubstrat. Messungen haben Zughaftfestigkeiten von  $> 6 \text{ N/mm}^2$  (Versagen des Klebers beim Abzugsversuch) ergeben.

Um eine gute Haftfestigkeit zwischen metallhaltiger Beschichtung und Kunststoffsubstrat zu erreichen, ist es notwendig, das Kunststoffsubstrat vor der Beschichtung von Verunreinigungen zu befreien (beispielsweise von Gleitmittel vom Herstellungsprozeß, von Verunreinigungen vom Verpackungsmaterial etc.). Dies kann beispielsweise durch den Einsatz flüssiger Reinigungsmittel erfolgen, zweckmäßig wird jedoch die Reinigung mit Hilfe eines Niederdruckplasmas durchgeführt (siehe z. B. A. Mann, Plasmamodifikation von Kunststoffoberflächen zur Haftfestigkeitssteigerung von Metallschichten, Dissertation, Universität Stuttgart, 1993). Im Niederdruckplasma werden die Gase angeregt (ionisiert, radikalisiert) und treffen mit zum Teil hoher kinetischer Energie auf das Substrat bzw. auf die Verunreinigung. Dadurch werden die Verunreinigungen abgetragen oder zersetzt und können über die Gasphase abtransportiert werden. Durch dieses Behandlungsverfahren kann es darüber hinaus zu einer Aktivierung der Substratoberfläche kommen, was schließlich zu einer gesteigerten Haftfestigkeit führt.

Als Ausgangsmaterialien für die Herstellung der metallhaltigen Schicht eignen sich zahlreiche metallorganische und organometallische Verbindungen. Bei den Metallen Titan, Zirkonium und Hafnium kommen beispielsweise die folgenden Verbindungsgruppen in Betracht:

45 Amidoverbindungen: z. B.  $\text{M}[\text{N}(\text{CH}_3)_2]_4$ ,  $\text{M}[\text{N}(\text{C}_2\text{H}_5)_2]_4$ ,  $\text{M}[\text{N}(\text{CH}_2)(\text{C}(\text{CH}_3)_2)]_4$

Imidoverbindungen: z. B.  $(\text{N}^i\text{Bu})\text{M}[\text{N}(\text{CH}_3)_2]_2$ ,  $(\text{N}^i\text{Bu})\text{M}[\text{N}(\text{C}_2\text{H}_5)_2]_2$

Verbindungen mit M-C-Bindung: z. B.  $\text{M}(\text{CH}_2^i\text{Bu})_4$ ,  $(\text{C}_5\text{H}_5)_2\text{MCl}_2$  mit  $\text{M} = \text{Ti, Zr oder Hf}$ .

Für die Metalle Tantal und Niob kommen die folgenden Verbindungsgruppen in Betracht:

Amidoverbindungen: z. B.  $\text{M}[\text{N}(\text{CH}_3)_2]_5$ ,  $\text{M}[\text{N}(\text{C}_2\text{H}_5)_2]_5$

50 Imidoverbindungen: z. B.  $[\text{N}(\text{C}_2\text{H}_5)_2]_3\text{M}=\text{N}^i\text{Bu}$  mit  $\text{M} = \text{Ta oder Nb}$ .

Sofern die Ausgangssubstanzen nicht gasförmig vorliegen, müssen diese in die Gasphase überführt werden. Für den Transport der Ausgangsverbindungen in den Reaktionsraum wird ein Trägergas verwendet. Als Trägergas kommen beispielsweise Stickstoff und Wasserstoff, sowie alle Edelgase in Betracht. Die Trägergase können auch Reaktionsgase sein, z. B. Stickstoff.

55 Im Reaktor wird ein Druck von ca. 0,1 bis 1030 mbar aufrechterhalten. Bei Verwendung eines Plasmas sollte der Druck  $< 50 \text{ mbar}$  betragen, um zu hohe Temperaturen durch das Plasma zu vermeiden.

Das im Reaktor befindliche, zu beschichtende Kunststoffsubstrat wird in der Regel direkt beheizt. Die Temperatur sollte nicht mehr als  $100^\circ\text{C}$  betragen, da es sonst zu einer Schädigung des Kunststoffsubstrats kommen kann. Zusätzliche Energie wird z. B. durch Einkoppelung eines Plasmas oder durch einen Laser zur Verfügung gestellt. Die im Gasraum befindlichen Ausgangssubstanzen gelangen an die Substratoberfläche und werden dort unter Zersetzung und Reaktion abgeschieden. Eine schematische Darstellung des Verfahrens ist der Fig. 3 zu entnehmen. Zunächst erfolgt der Antransport (1) der Ausgangssubstanzen mit Hilfe eines Trägergases. Durch Diffusion und Adsorption (2) gelangt die Ausgangssubstanz an die Substratoberfläche, wo eine Reaktion (3) der Ausgangssubstanzen stattfindet. Flüchtige abgespaltene Reste werden durch Diffusion (4) wieder in die Gasphase zurückgeführt und dann erfolgt der Abtransport (5). Das metallhaltige Reaktionsprodukt wird dagegen auf der Oberfläche des Substrats abgeschieden.

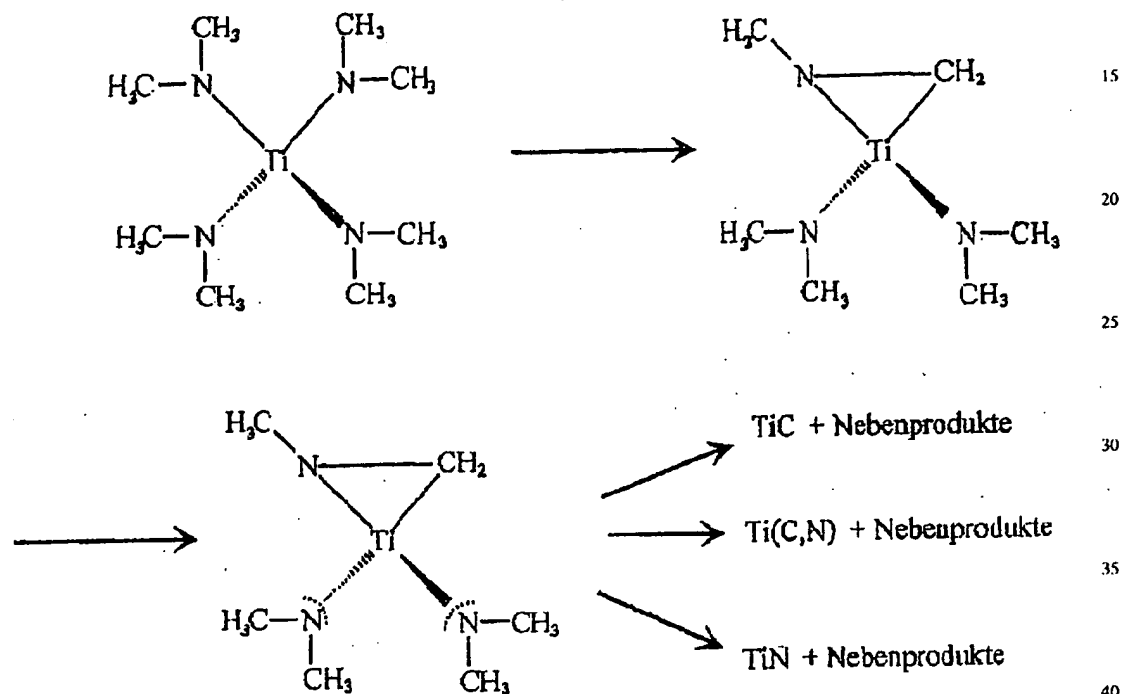
Zunächst ist die Wirkung des eingekoppelten Plasmas gering, und die zunächst auf der Substratoberfläche abgeschiedene Substanz enthält noch beträchtliche Mengen an Kohlenstoff. Diese Verbindungen haben eine hohe Affinität zur Oberfläche des Kunststoffsubstrats und können in dieses zum Teil eindiffundieren, wodurch es zu einer starken Haftung

kommt. Mit zunehmender Beschichtung des Substrats erhöht sich die Wirkung des Plasmas, es steht mehr Energie zur Verfügung, und die Umsetzungsreaktionen der Ausgangssubstanzen verlaufen immer vollständiger, d. h. es wird immer weniger Kohlenstoff, dafür aber prozentual mehr Metall in die Schicht eingebaut.

Dies führt letztlich dazu, daß durch den hohen Kohlenstoffgehalt der anfänglich abgeschiedenen Schicht eine innige fest haftende Verbindung zwischen der Kunststoffsubstratoberfläche und der metallhaltigen Schicht entsteht.

Bei einer Schichtdicke von ca. 20 nm ist die endgültige Zusammensetzung der metallhaltigen Schicht erreicht. Bei zunehmender Schichtdicke ändert sich die Zusammensetzung nicht mehr. Erst nach dem Abbruch des Beschichtungsverfahrens kommt es noch zu einer geringfügigen Änderung der Zusammensetzung in dem äußersten Teil der metallhaltigen Schicht, wie die Fig. 1 und 2 zeigen.

Das nachfolgende Schema zeigt die stufenweise zunehmende Reaktion am Beispiel der Ausgangsverbindung  $\text{Ti}[\text{N}(\text{CH}_3)_2]_4$  in Abhängigkeit zunehmend vorhandener Energie für die Reaktion:



Wie der Fig. 1 zu entnehmen ist, besteht die metallhaltige Schicht in einer Schichttiefe von ca. 2 nm, was zeitlich dem Abbrechen der Beschichtungsreaktion entspricht, aus ca. 40 Atom-% Ti, 35 Atom-% C, 15 Atom-% N und 10 Atom-% O. Eine solche Zusammensetzung weist eine außerordentlich günstige Verträglichkeit mit Blut auf, so daß sich derartige beschichtete Kunststoffsubstrate hervorragend zur Herstellung von künstlichen Gefäßimplantaten eignen.

Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren ist es erstmalig gelungen, die Beschichtungstemperaturen auf ca. 100°C abzusinken und somit die erforderlichen Temperaturen einzuhalten, bei denen das Kunststoffsubstrat nicht geschädigt wird. Insbesondere bei Verwendung von Wasserstoff als Trärgas sind sehr niedrige Beschichtungstemperaturen möglich.

Wie in der Fig. 2 gezeigt, nimmt die Oberfläche der metallhaltigen Schicht im Laufe der Zeit Sauerstoff auf. Wenn dies vermieden werden soll, eignet sich eine Nachbehandlung im Stickstoffplasma. Diese führt zu einer deutlichen Erhöhung des Stickstoffgehaltes der Oberfläche der metallhaltigen Schicht, und es kommt dadurch zu einer erheblichen Reduzierung der nachträglichen Sauerstoffaufnahme.

Durch das erfindungsgemäße Verfahren ist eine Beschichtung von Kunststoffsubstraten mit komplizierten Geometrien möglich, da die Ausgangssubstanz vor der Reaktion gleichmäßig mit dem zu beschichtenden Substrat in Kontakt kommt. Die Konzentration der Ausgangsverbindung ist dabei im Reaktionsraum relativ niedrig, um ein möglichst frühes Zusammenwachsen der Schichten und somit eine möglichst geringe Schichtdicke zu erreichen. Dies führt zu einer extrem glatten Oberfläche der Schicht, wodurch die hervorragende Verträglichkeit gegenüber Körperflüssigkeiten, wie z. B. Blut, gewährleistet wird.

Durch die Erfindung können bioverträgliche Oberflächen mit einer sehr guten elektrischen Leitfähigkeit auf ansonsten nicht leitenden Kunststoffen erzeugt werden, wodurch eine Vielzahl von neuen Anwendungsgebieten in der Medizintechnik erschlossen wird.

#### Beispiel

Zunächst wurde das zu beschichtende Kunststoffsubstrat an seiner Oberfläche in einem Niederdruckplasma gereinigt. Dazu wurde Stickstoff mit einer Geschwindigkeit von ca. 5 l/h i.N. in den Reaktor eingeleitet, wobei mittels einer Vakuumpumpe im Reaktor ein Druck von ca. 1 mbar aufrechterhalten wurde. Durch einen außen liegenden Kupferring wurde mit 50 W ein induktives Plasma mit einer Frequenz von 13,56 MHz eingekoppelt. Die Behandlungsdauer betrug ca.

3 min (sie kann bei Bedarf abgekürzt werden).

Als flüssige organometallische Ausgangsverbindung wurde  $Ti[N(CH_3)_2]_4$  eingesetzt. Die Ausgangsverbindung wurde bei 5°C mit reinem Wasserstoff durchströmt. Durch die Kühlung des Verdampfers wird eine zu hohe Konzentration der Ausgangssubstanz im Reaktionsraum und damit ein ungleichmäßiger Schichtaufbau vermieden.

Der mit der Ausgangssubstanz beladene Wasserstoff strömt in den Reaktor, in welchem sich das auf ca. 100°C aufgeheizte, im Niederdruckplasma vorbehandelte Kunststoffsubstrat (PET) befindet. Die Reaktion der Ausgangsverbindung wird durch zusätzliche Energiezufuhr, nämlich durch Einkoppeln eines Niederdruckplasmas ausgelöst. Das Plasma wird bei einem Druck im Reaktionsraum von ca. 1 mbar mittels des außen liegenden Kupferings bei einer Frequenz von 13,56 MHz induktiv eingekoppelt. Dadurch wird das Gas im Bereich des Substrats teilweise ionisiert bzw. es kommt zu einer Radikalbildung. Entscheidend ist dabei, daß durch den reduzierten Druck im Gasraum die Gastemperatur selbst nur unwesentlich erhöht wird, jedoch Teilchen im Gas enthalten sind, die extrem energiereich sind und somit die Reaktion bei Temperaturen in Gang gesetzt werden kann, die erheblich reduziert sind.

Zunächst kommt es nur zu einer teilweisen Reaktion der Ausgangssubstanz und der anfängliche Schichtaufbau besteht aus einer metallhaltigen Verbindung, die noch sehr reich an Kohlenstoff ist, während die anderen Bestandteile, wie das Metall und der Stickstoff, nur in geringen prozentualen Anteilen vorhanden sind. Dies führt zu einer besonders guten Haftung an dem Kunststoffsubstrat, die durch eine Diffusion der anfänglich abgeschiedenen Teilchen in den Kunststoff noch verstärkt wird.

Durch den beginnenden Aufbau der metallhaltigen Schicht verändern sich die Oberflächeneigenschaften des Substrats und die Wirkung des eingekoppelten Plasmas auf das nun schon teilweise beschichtete Substrat nimmt zu. Durch die zunehmend günstigeren Energieverhältnisse kommt es zu weitergehenden Reaktionen der Ausgangsverbindungen, d. h., die Zusammensetzung der abgeschiedenen Schichten verändert sich im Laufe der Zeit, wobei der Kohlenstoffgehalt stetig abnimmt, während der Gehalt an Stickstoff und Metall zunimmt.

Der Beschichtungsvorgang wurde bei einer Schichtdicke von ca. 10 nm abgebrochen. Die Fig. 1 zeigt in einer Schichttiefe von ca. 2 nm eine Zusammensetzung, die aus ca. 40 Atom-% Ti, 35 Atom-% C, 15 Atom-% N und 10 Atom-% O besteht. Diese Schichtzusammensetzung entspricht zeitlich dem Abbruch des Beschichtungsverfahrens. Im Abklingen der Reaktion ändert sich die Zusammensetzung wiederum ein wenig, wie der Fig. 1 ebenfalls zu entnehmen ist.

Der erhaltene Verbundwerkstoff wurde mit XPS (X-ray photoelectron spectroscopy) auf seine Schichtzusammensetzung hin untersucht. Die Tiefenprofile wurden durch Absputtern der Schichten mit  $Ar^+$  aufgenommen. Das Ergebnis ist in Fig. 1 gezeigt.

Eine erneute Untersuchung der Schichtzusammensetzung nach Lagerung des Verbundwerkstoffes an Luft ergab nach 2 Wochen eine Zusammensetzung, die der Fig. 2 entspricht. Der Kohlenstoffgehalt und auch der Sauerstoffgehalt hatten aufgrund von Sauerstoffaufnahme und Oberflächenverunreinigungen zugenommen.

Eine Messung der Leitfähigkeit der Schichten ergab unmittelbar nach der Beschichtung einen Wert von  $L = 2,1 \text{ (Ohm} \cdot \text{cm)}^{-1}$  und nach 3-tägiger Lagerung an Luft einen Wert von  $L = 0,18 \text{ (Ohm} \cdot \text{cm)}^{-1}$ .

Weiterhin wurde die Zughaftfestigkeit der metallhaltigen Schicht am Kunststoffsubstrat gemessen. Es wurden Werte von  $> 6 \text{ N/mm}^2$  gemessen. Das heißt, daß beim Abzugsversuch der Kleber versagte, während die metallhaltige Schicht am Kunststoffsubstrat haften blieb.

Schließlich wurden gemäß dem Verfahren, das in dem oben erwähnten Artikel von Dion et al. beschrieben ist, Rauheitsmessungen der metallhaltigen Schichten durchgeführt. Es ergaben sich Werte von  $R_a = 0,008 \text{ } \mu\text{m}$  und  $R_z = 0,1 \text{ } \mu\text{m}$ .

#### Patentansprüche

1. Verbundwerkstoff, bestehend aus einem Kunststoffsubstrat und einer dünnen metallhaltigen Schicht, **dadurch gekennzeichnet**, daß die metallhaltige Schicht duktil ist, fest auf dem Kunststoffsubstrat haftet, eine Dicke von  $< 2 \text{ } \mu\text{m}$  aufweist und aus einer Metallverbindung der Formel



besteht, in welcher bedeuten:

M ein oder mehrere Metalle aus der Gruppe Ti, Ta, Nb, Zr und Hf,

a = 0,025 bis 0,9

b = 0,025 bis 0,7

x = 0 bis 0,9

y = 0 bis 0,7

z = 0 bis 0,7

a + b + x + y + z = 1,

mit der Maßgabe, daß der Wert von a von der Substratoberfläche ausgehend von einem Wert nahe Null zur Schichtoberfläche hin zunimmt.

2. Verbundwerkstoff nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das Kunststoffsubstrat aus Polyethylenterephthalat, Polyurethan, Polytetrafluorethylen, Polyamid oder Polypropylen besteht.

3. Verbundwerkstoff nach den Ansprüchen 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß M = Ti ist.

4. Verbundwerkstoff nach den Ansprüchen 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß für die Werte von a, b, x, y und z folgendes gilt:

(i) an der Basis der metallhaltigen Schicht:

a = 0,025–0,1

b = 0,025–0,2

x = 0,8–0,9



y = 0-0,1

z = 0-0,1

(ii) mit zunehmender Dicke der metallhaltigen Schicht wird der Wert von a größer, und

(iii) nahe der Oberfläche der metallhaltigen Schicht:

a = 0,2-0,9

b = 0,025-0,7

x = 0-0,7

y = 0-0,7

z = 0-0,5.

5. Verfahren zur Herstellung eines Verbundwerkstoffes nach den Ansprüchen 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß man

a) das Kunststoffsubstrat reinigt,

b) eine geeignete metallorganische oder organometallische Ausgangsverbindung auswählt,

c) die metallorganische oder organometallische Ausgangsverbindung, sofern sie nicht gasförmig ist, in die Gasphase überführt,

d) die gasförmige metallorganische oder organometallische Verbindung Ausgangsverbindung mit Hilfe eines Trärgases in einen Reaktor befördert, in welchem sich das Kunststoffsubstrat befindet,

e) dem Substrat durch Beheizen, Plasmaeinkoppelung oder Laserbestrahlung etc. Energie so zuführt, daß eine Temperatur von 100°C nicht überschritten wird, und

f) im Reaktionsraum einen Druck von 0,1 bis 1030 mbar, bei Einsatz eines Plasmas einen Druck von < 50 mbar aufrechterhält.

6. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß als Trärgas Wasserstoff verwendet wird.

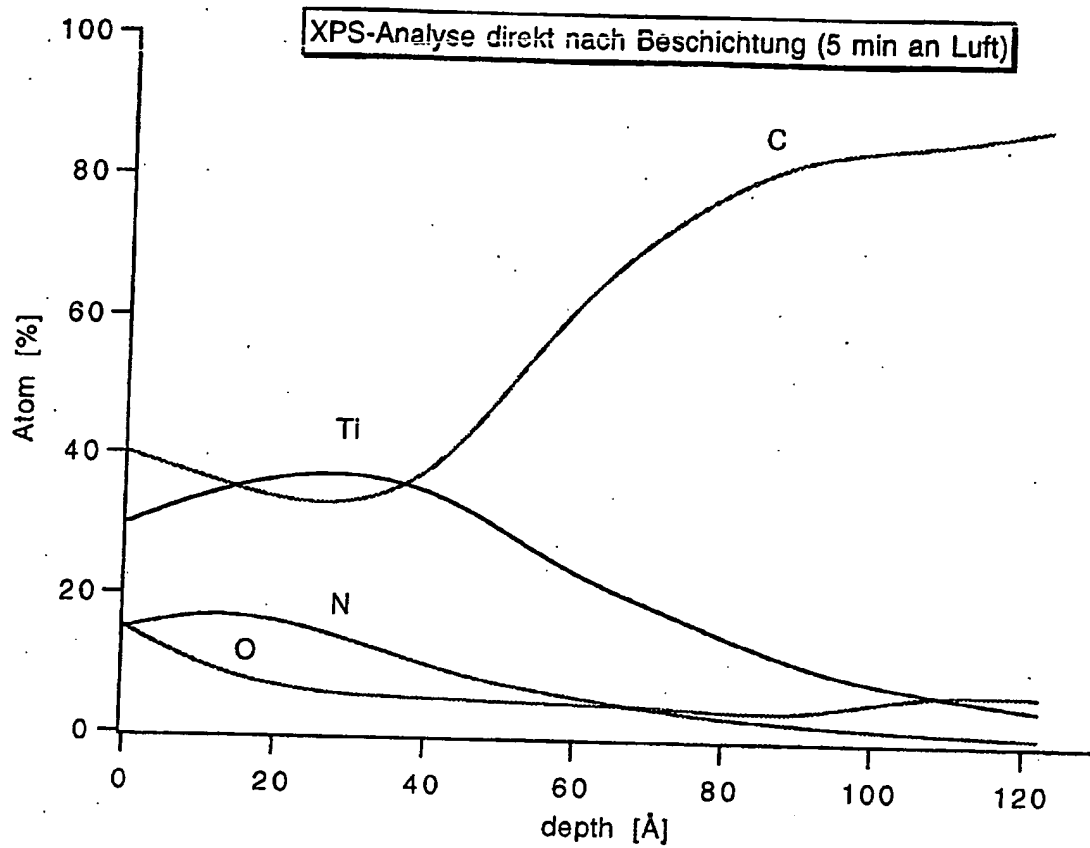
7. Verfahren nach den Ansprüchen 5 oder 6, dadurch gekennzeichnet, daß als metallorganische oder organometallische Verbindung  $M[N(CH_3)_2]_4$ ,  $M[N(C_2H_5)_2]_4$ ,  $M[N(CH_2(C[CH_3]_2))_4]$ ,  $((N^tBu)M[N(CH_3)_2]_2)_2$ ,  $((N^tBu)M[N(C_2H_5)_2]_2)_2$ ,  $M(CH_2^tBu)_4$  und/oder  $(C_3H_5)_2MCl_2$  eingesetzt wird, wobei M = Ti, Zr oder Hf.

8. Verfahren nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß als metallorganische oder organometallische Verbindung  $Ti[N(CH_3)_2]_4$  eingesetzt wird.

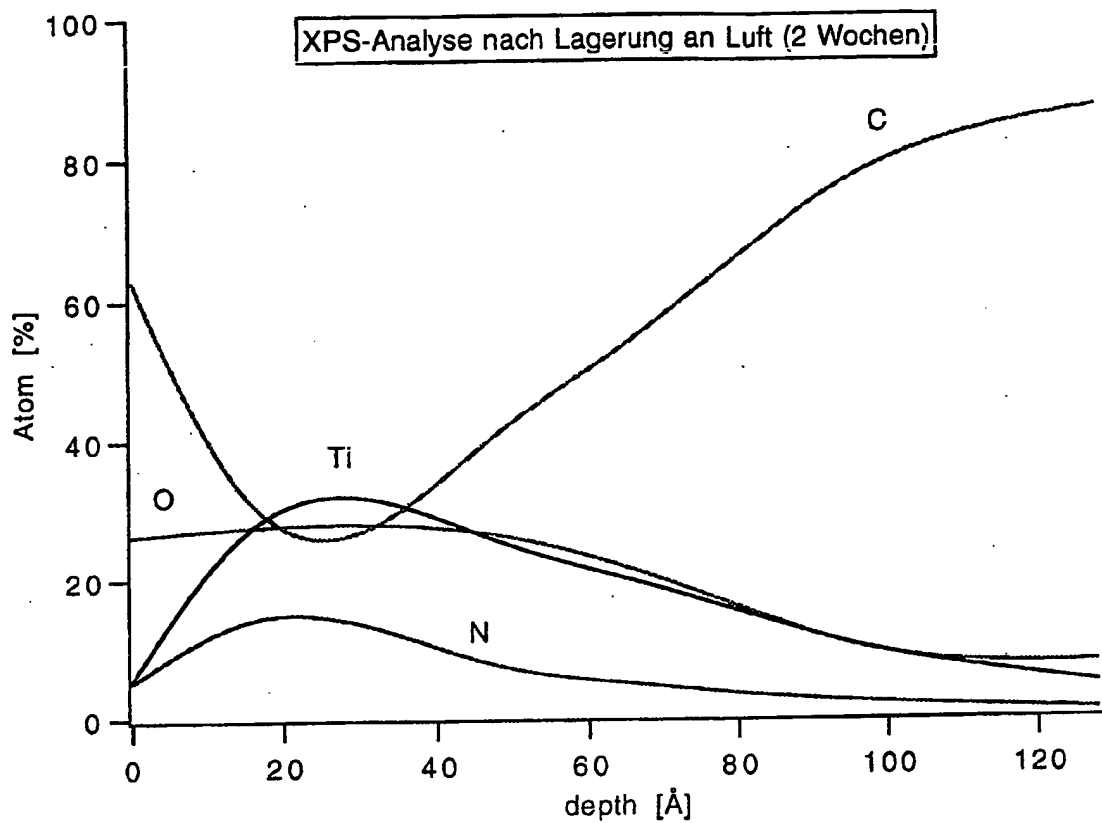
9. Verfahren nach den Ansprüchen 5 oder 6, dadurch gekennzeichnet, daß als metallorganische oder organometallische Verbindung  $M[N(CH_3)_2]_5$ ,  $M[N(C_2H_5)_2]_5$  und/oder  $[N(C_2H_5)_2]_3M=N^tBu$  eingesetzt wird, wobei M = Ta oder Nb.

10. Verfahren nach einem der Ansprüche 5 bis 9, dadurch gekennzeichnet, daß für die Zuführung ausreichender Energie ein Plasma eingekoppelt wird.

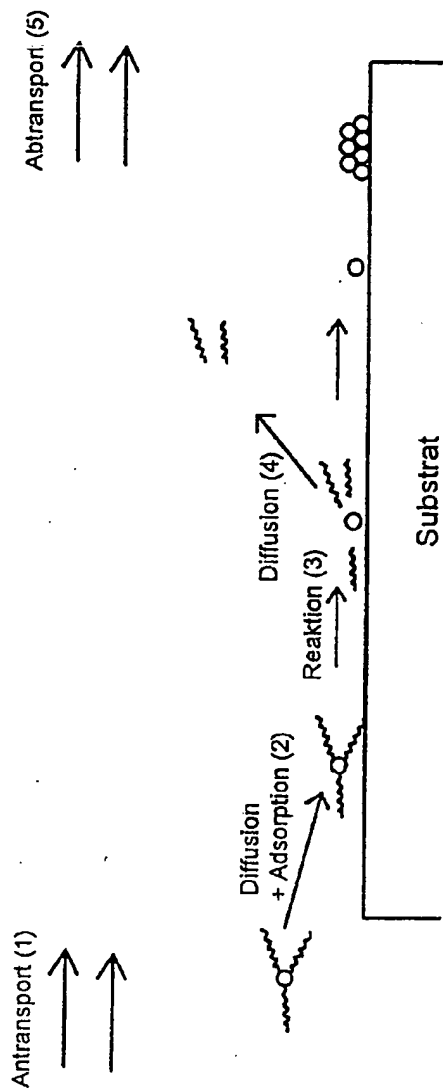
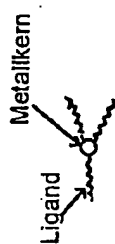
Hierzu 3 Seite(n) Zeichnungen



FIGUR 1



**FIGUR 2**



FIGUR 3